А. Г. Соболевский



МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ — ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 482

А. Г. СОБОЛЕВСКИЙ

МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ — ЧТО ЭТО ТАКОЕ?



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.375.3
С 54

В брошюре, предназначенной для широких кругов читателей, рассказано о принципах работы одного из устройств современной автоматики—магнитного усилителя, его конструкции и налаживании. Обо всем этом говорится очень популярно, но все же так, что, прочитав брошюру, читатель сможет сам построить простой магнитный усилитель.

РАЗГОВОР С БИБЛИОГРАФОМ

Однажды я сидел у каталога технической библиотеки и просматривал один из ящиков. Недалеко от меня за столиком с табличкой «Дежурный библиограф» работала женщина. К ней подошел юноша и сказал:

— Простите, я не нашел в систематическом каталоге магнитных усилителей.

— В каком разделе вы смотрели? — спросила в свою очередь библиограф.

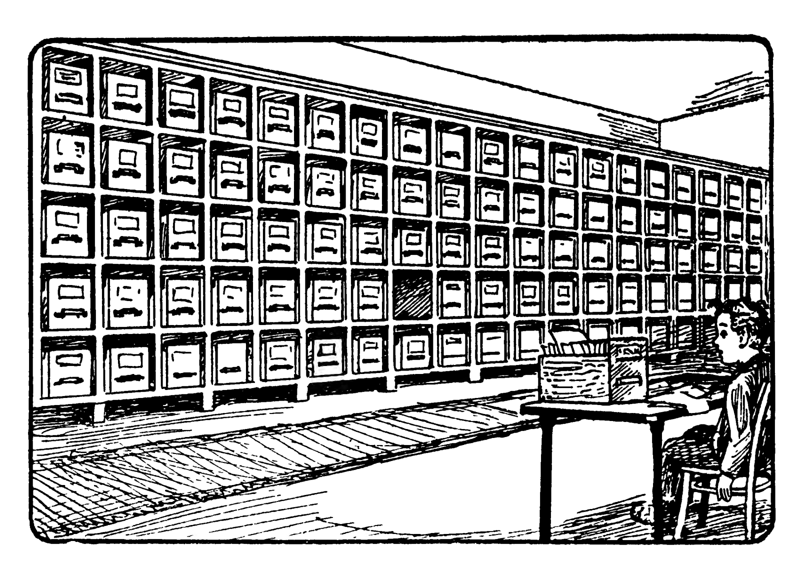
— В разделе «Усилители».

— А какие усилители? В каком общем разделе?

Молодой человек недоумевал:

— В разделе радиотехники! Там всякие усилители были: и электронные, и транзисторные, а вот магнитных не было.

— И не могло быть,— подтвердила библиограф.

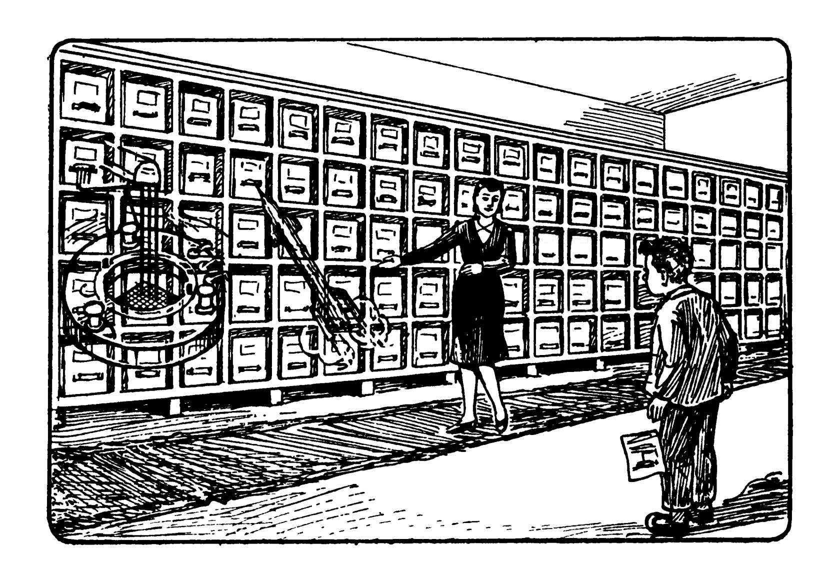


— Почему?

— Потому что магнитные усилители надо смотреть в разделе «Автоматика».

Я улыбнулся озадаченности юноши, но его собеседница осталась серьезной. Она продолжала терпеливо объяснять:

— Магнитные усилители хотя и имеют некоторое отношение к радиотехнике, но в основном предназначены для работы в системах автоматики и телемеханики. Например, они очень широко применяются в системах автоматического контроля за работой станков



и машин, в системах автоматического управления, вплоть до управления космическими ракетами. Поэтому они и относятся к элементам автоматики. Возьмите ящик под рубрикой «Автоматика и телемеханика» и найдите в нем магнитные усилители.

Ответ был исчерпывающим, но он явно разочаровал читателя. Библиограф заметила это.

— Вы еще хотите что-нибудь спросить?

— Значит, в радиотехнике они не применяются?

— Как вам сказать,— задумалась женщина.— Видите ли, еще сравнительно недавно магнитных усилителей не было, а их функции в автоматических устройствах выполняли электронные усилители. И пока автоматическим устройствам не поручали очень сложных и ответственных задач, все шло хорошо. Но когда автоматические устройства стали самостоятельно управлять работой поточных линий, полетом ракет, производить сложнейшие расчеты и от их надежности стало зависеть очень и очень многое, вплоть до жизни людей, то обнаружилось, что электронные усилители обладают очень

неприятными для автоматики недостатками: малой долговечностью работы электронных ламп, чувствительностью к ударам и вибрациям и необходимостью некоторого промежутка времени после включения для разогрева катодов электронных ламп.

— Разве это такие существенные недостатки?— усомнился юноша.

— Да, очень существенные! Конечно, ничего страшного не случится, если в вашем радиоприемнике или телевизоре перегорит радиолампа. Пойдете в магазин и купите, в крайнем случае посидите вечер без телевидения. А вот представьте, что перегорит или разобьется от тряски радиолампа в усилителе автоматического устройства, управляющего полетом самолета. Произойдет катастрофа!





— Но ведь лампы не так уж часто перегорают!

— Давайте подсчитаем! Продолжительность срока службы электронной лампы редко превышает 1 000—2 000 *ч*. Предположите, что в сложном автоматическом устройстве работает 5 000 электронных ламп. Тогда в среднем в этом устройстве каждые 2 часа будет выходить из строя какая-нибудь электронная лампа. Подумайте, можно ли такому устройству доверить что-нибудь ответственное! И этот пример самый жизненный. Пришлось искать что-то более надежное, чем хрупкая электронная лампа. Вот тогда и появились магнитные усилители.

— Значит, магнитные усилители теперь заменяют электронные?

Библиограф покачала головой.

— Этого нельзя сказать. Появление магнитных усилителей вовсе не означает исчезновение усилителей на электронных лампах. Дело в том, что магнитные усилители в основном применяются для усиления постоянных или медленно изменяющихся токов, а также токов низкой (промышленной — 50 *гц*) частоты. Если вы знаете радиотехнику, то вам известно, что в области очень низких частот электронные усилители работают неважно, а получить стабильное усиление постоянного тока с их помощью вообще трудно. Но вот в области более высоких частот магнитные усилители почти не применяются, во всяком случае на этих частотах они значительно уступают электронным усилителям.

Для систем автоматики в большинстве случаев требуется усиление постоянных токов или токов сравнительно низкой частоты. Поэтому в этих системах магнитные усилители вытеснили электронные. Они обладают перед ними значительными преимуществами: высокой надежностью и очень большим сроком службы, поскольку в них нет накаливающегося катода, хрупких стеклянных колб, высо-

кого вакуума и «изящной» конструкции, как в электронной лампе. Они не требуют времени на разогрев и готовы к работе сразу после включения. Им не нужны периодический уход и обслуживание, регулировка в процессе работы, они обладают очень большим коэффициентом усиления в одном каскаде — до 1 000 000!



— Но все же — в радиотехнике они применяются? — не успокаивался юноша.

— Применяются, но там они не заменяют электронные усилители, а чаще всего работают вместе с ними, как, например, в импульсной технике.

На этом их разговор окончился. Поблагодарив, юноша отыскал в каталоге ящик под рубрикой «Автоматика и телемеханика» и начал выписывать названия нужных ему книг.

НЕМНОГО ФИЗИКИ

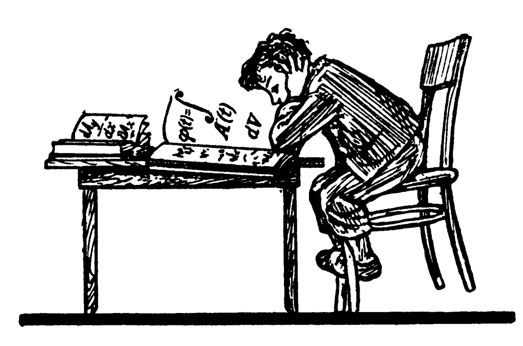
Позднее я заметил этого юношу в читальном зале. Он сидел обложенный объемистыми томами и, как мне показалось, с безнадежным видом перелистывал их. Мелькали страницы, испещренные математическими формулами.

Не знаю почему, но этот очень симпатичный юноша, наверное еще школьник, пытавшийся проникнуть в тайну магнитных усилителей, запомнился мне. Возвращаясь из библиотеки, я раздумывал над его разговором с библиографом, вспоминал его беспомощность перед книгами, смысл которых зашифрован математическими символами. Я жалел, что не помог ему, не подсказал, с чего начать.

На следующий день я вновь пришел в библиотеку. Помнится, я даже обрадовался, когда опять увидел того же самого юношу.

Проходя мимо него, я заметил все те же книги о магнитных усилителях. И я дал себе слово, что сегодня подойду к нему и помогу.

Мы вышли из библиотеки уже познакомившись. Его зовут Павел, он учится в десятом классе и интересуется радиотехникой. Я признался, что слышал его разговор с библиографом и сказал,



что ему надо было начинать не с толстых книг о магнитных усилителях, а с элементарной физики.

— Да, да, не с радиотехники, не с теории автоматики и телемеханики, а с учебника физики, с разделов, посвященных магнетизму.

— При чем тут физика? — спросил он, сделав такое же недоуменное лицо, как тогда, в разговоре с библиографом.

— Да потому, что невозможно понять даже принцип действия магнитных усилителей, если не вспомнить сначала, чем отличается



ферромагнетик от других, диамагнитных веществ. Надо вспомнить, что такое магнитная индукция и напряженность магнитного поля, как ведут себя магнитные вещества в изменяющемся магнитном поле. Вы помните все это? — спросил я его.

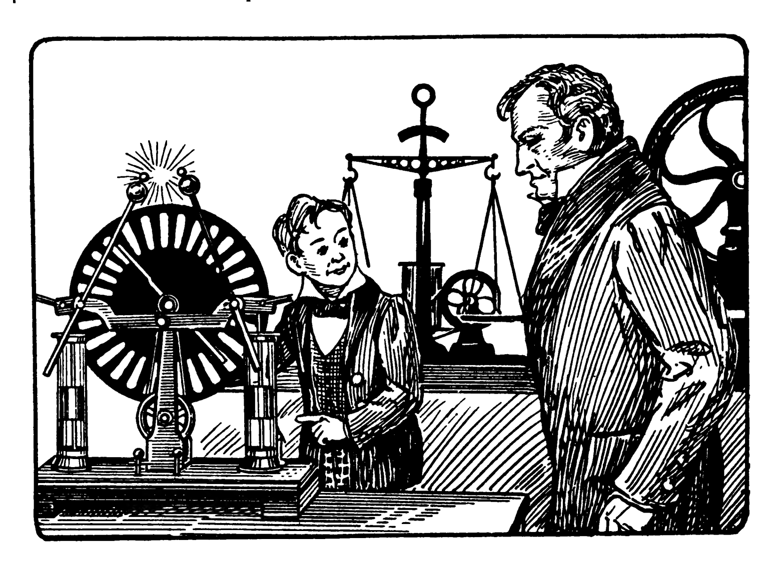
Он не очень уверенно приподнял брови.

— Вот видите,— сказал я.

— Но это можно вспомнить. Начнем! — улыбнулся он.

— Что ж,— согласился я.— До дому мне идти далеко, мы успеем. Придется начать с магнетизма.

— Только не надо начинать с глубокой древности. Не стоит рассказывать об изобретении китайцами компаса, который они изго-



товляли в виде человечка с вытянутой рукой. Этот человечек укреплялся на вращающейся оси на колеснице и всегда указывал на юг, как бы ни поворачивалась в пути колесница. Давайте лучше начнем с менее отдаленных времен.

«Ах вот ты какой», подумал я и проглотил начало популярной лекции, которую собирался было прочесть. Но чтобы все-таки проверить его, спросил:

— Хорошо, ну а что по-вашему представляет собой магнетизм? Что это такое?

Он хотел ответить, но, подумав, промолчал.

— А вот Ампер (тот самый, именем которого названа единица силы тока) на такой вопрос ответил, что магнетизма как такового вообще не существует и что все магнитные свойства веществ есть проявление взаимодействия электрических токов!

Мне кажется, для первой половины XIX века такой ответ был очень смелым. Позднее же выяснилось, что он был гениальным!

В самом деле, вы помните, что если по проводнику пропустить электрический ток, то вокруг проводника образуется магнитное поле, которое ничем не будет отличаться от поля, создаваемого обычным магнитом. Уже одно это подсказывает, что Ампер был прав.

— Но через обычный постоянный магнит не проходит электрический ток,— прервал меня Павел.— Значит, вокруг магнита образуется магнитное поле не в результате прохождения электрического тока!

Я улыбнулся поспешности, с которой он опроверг мои рассуждения.

— Так ли это? — спросил я.— Ведь вы хорошо знаете, что магнит, как и всякое тело, состоит из атомов. А что такое атом? Это ядро, вокруг которого обращаются электроны, причем они одновременно не только обращаются вокруг ядра, но и вращаются вокруг собственной оси.

— Подождите, я понял! Ведь электрический ток — это движение электронов. Следовательно, именно движение электронов вызывает магнитные явления вокруг проводника с током. В атомах вещества электроны тоже движутся вокруг ядра и одновременно вращаются вокруг собственной оси и тем самым создают магнитное поле. Ампер был прав!

Я имел дело со способным человеком! Это меня обрадовало.

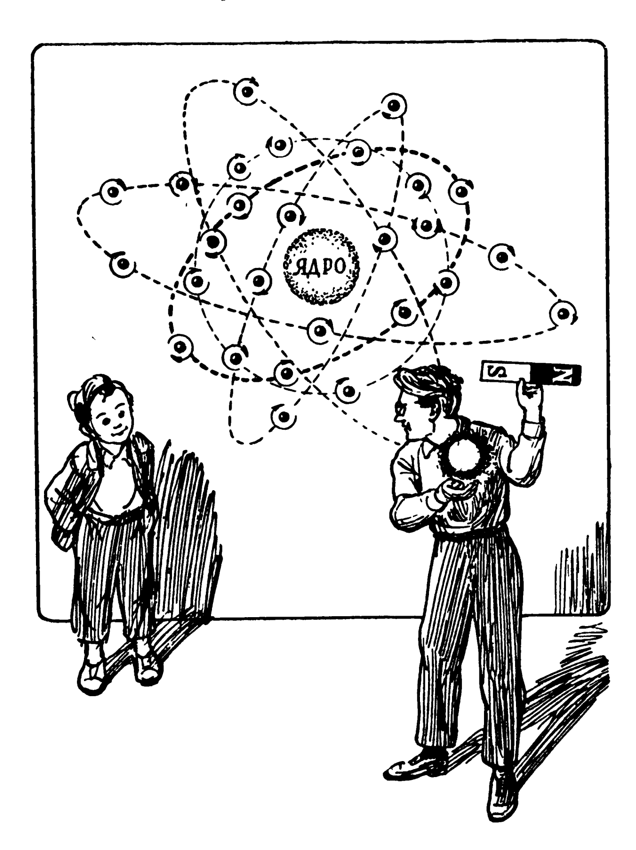
— Конечно, Ампер был прав, когда говорил, что магнетизма как необыкновенного вещества не существует. И если говорить упрощенно, то магнитные явления возникают так, как вы сейчас сказали. Но это только в том случае, если говорить очень и очень упрощенно! В действительности же все значительно сложнее. Дело в том, что главную роль в возникновении магнетизма играет вращение электронов вокруг собственной оси — так называемый спин электронов. Каждый электрон представляет собой как бы элементарный магнитик, направление полюсов которого зависит от направления вращения электрона вокруг собственной оси — от направления спина. Однако для возникновения выраженного магнетизма вещества спины электронов его атомов должны быть направлены в одну и ту же сторону, иначе магнитные моменты электронов будут взаимно компенсироваться и атом в целом будет магнитно нейтральным. И надо заметить, что большинство электронов в атомах имеют взаимно скомпенсированные спины и лишь очень небольшое число электронов имеют некомпенсированные спины.

— Мне кажется, наличие электронов с некомпенсированными спинами и отличает ферромагнитные вещества (вещества с ярко выраженными магнитными свойствами) от диамагнитных веществ?— спросил Павел.

Я покачал головой.

— Нет, дело сложнее. Ведь электронами с некомпенсированными спинами обладают не только ферромагнетики — железо, никель, кобальт и гадолиний, но и марганец, хром, ванадий и многие другие элементы. Для возникновения ферромагнетизма необходимо не только наличие в атомах вещества электронов с некомпенсированными спинами, но главным образом особое взаимодействие электронов с такими спинами между собой, причем это взаимодействие проявляется в виде перехода электронов с некомпенсированными спинами из одних атомов в другие. Такие переходы приводят к тому, что электроны с некомпенсированными спинами как бы «кол-

лективизируются». Они уже не принадлежат каким-то определенным атомам в кристаллической решетке вещества. Благодаря этому в некоторых областях кристаллической решетки спины целой группы электронов оказываются направленными одинаково и такая область, называемая доменом, намагничивается как бы самопроизвольно. Вот такое самопроизвольное намагничивание отдельных об-



ластей вещества и характерно для ферромагнетизма. Это и определяет их ярко выраженные магнитные свойства.

— Да, это не так просто, как я вначале думал, — согласился юноша.

— И заметьте, даже сейчас я рассказал о природе ферромагнетизма очень упрощенно, особенно о том, что касается появления в веществе электронов с некомпенсированными спинами и причин обмена такими электронами между атомами. Но нам нет необходимости вникать в эти очень сложные детали атомной физики. Я думаю,

теперь следует поговорить о поведении ферромагнитного вещества в магнитном поле. Именно это будет нам необходимо, когда мы начнем разговор о принципе действия магнитных усилителей.

— Что ж, согласен. Знаете, атомная физика мне всегда кажется такой увлекательной и таинственной, что я готов разговаривать о ней сколько угодно. Жаль, уж очень она сложна!



— Да, она требует хорошей подготовки, особенно в области математики. Кстати, нам тоже не обойтись без математики.

Павел насторожился. Вероятно, он вспомнил о толстых книгах, начиненных формулами.

— Успокойтесь, мы обойдемся без интегрального исчисления! Так как же ведет себя ферромагнетик, например сердечник обыкновенного трансформатора, помещенный в магнитное поле?

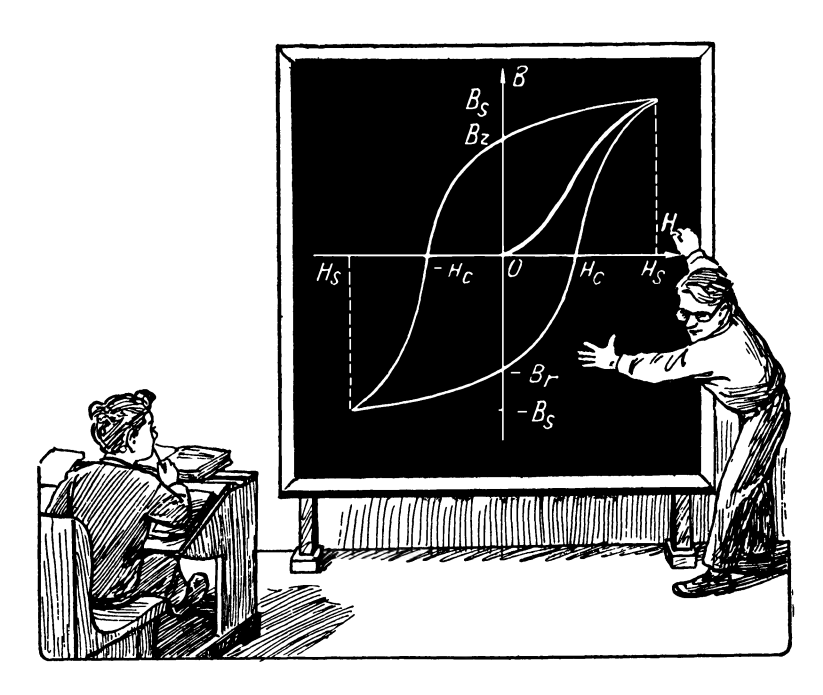
— Он намагничивается.

— Правильно. Давайте проследим, как будет происходить это намагничивание, если магнитное поле изменяется. При внесении сердечника в магнитное поле в сердечнике появится магнитный поток. Вы помните, что магнитный поток принято изображать магнитными силовыми линиями, число которых характеризует величину потока. Число же магнитных силовых линий, приходящееся на единицу площади поперечного сечения сердечника, носит название магнитной индукции *B*. Припомнили эти основные характеристики магнитных явлений?

Павел сосредоточенно кивнул.

— Предположим далее, что напряженность магнитного поля (она обозначена через *H*), в которое мы поместили сердечник, изменяется. Когда напряженность магнитного поля равна нулю, т. е.

поля нет, магнитная индукция сердечника тоже равна нулю. Начнем увеличивать напряженность поля (см. рис. на стр. 12). Магнитная индукция сердечника также увеличится, причем вначале медленно, затем почти скачком и далее опять будет следовать за увеличением напряженности магнитного поля, очень мало повышаясь. Наконец при некотором значении напряженности магнитного поля H_s она

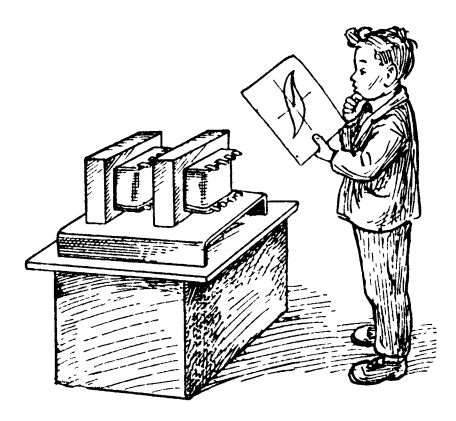


достигнет максимума и почти перестанет возрастать, несмотря на дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля. Такая максимально возможная величина магнитной индукции сердечника B_s называется индукцией насыщения сердечника. Она характеризует его полную намагниченность (насыщение). Сердечник больше не может принять магнитной энергии и не реагирует на дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля.

Теперь следите внимательно — начинается самое главное! Начнем уменьшать напряженность магнитного поля. Магнитная индукция сердечника также начнет уменьшаться, но изменяться она будет не так, как до этого возрастала. Выражаясь языком техники, изменение (уменьшение) магнитной индукции сердечника будет происходить по новой кривой, отличной от кривой первоначального намагничивания. Это явление носит название магнитного гистерезиса.

— Чем оно вызвано?

— Намагниченностью сердечника. Сердечник как бы аккумулировал магнитную энергию. Напряженность внешнего магнитного поля может упасть до нуля, а сердечник все же останется намагниченным, будет обладать магнитной индукцией B_r, которая в этом случае так и будет называться: остаточная магнитная индукция сердечника. Чтобы уничтожить эту остаточную намагниченность сердечника — полностью размагнитить сердечник, его надо поместить в магнитное поле обратного направления с напряженностью — H_c. Такая величина напряженности размагничивающего поля носит название коэрцитивной силы.



— А если продолжать увеличивать напряженность магнитного поля в обратном направлении?

— Тогда при некоторой напряженности поля —H_s, численно равной напряженности H_s, сердечник достигнет стадии насыщения с магнитной индукцией — B_s, численно равной B_s. Но если теперь вновь изменять напряженность поля от —H_s к нулю, то изменение магнитной индукции сердечника будет происходить опять по новой кривой. При нулевой напряженности внешнего магнитного поля сердечник будет обладать индукцией —B_r остаточной намагниченности, уничтожить которую можно при помощи внешнего магнитного поля с напряженностью H_c.

— Понимаю, — остановил меня юноша, — если продолжать увеличивать напряженность более H_c, то индукция сердечника возрастет до значения индукции насыщения B_s, а кривая изменения индукции сердечника замкнется.

— Образовав петлю, называемую петлей гистерезиса, — подсказал я.

— Ну, а зачем нам все это?

Вопрос логичный! Пора было переходить к магнитным усилителям.

ЭТО ЖЕ СОВСЕМ ПРОСТО!

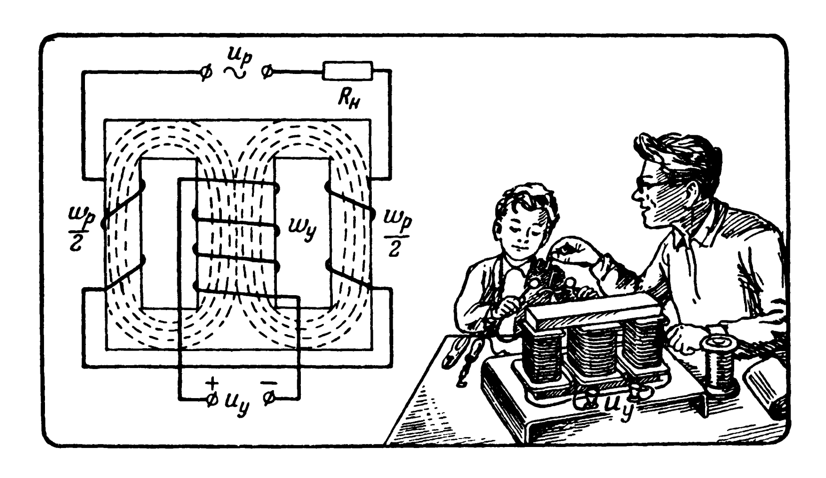
— Намотаем на сердечник трансформатора, который мы испытывали, две обмотки. На средний стержень (керн сердечника) поместим обмотку $w_у$ и назовем ее обмоткой управления. Она будет присоединена к источнику постоянного тока с напряжением $u_у$ (стр. 14).

На крайние стержни сердечника намотаем обмотку $w_р$ и соединим ее через сопротивление нагрузки $R_н$ с источником переменного тока. Эту обмотку назовем рабочей, а цепь, в которую она включена, рабочей цепью.

Чтобы определить ток в рабочей цепи, надо напряжение рабочей цепи $u_р$ разделить на сопротивление этой же цепи:

$$i = \frac{u_р}{z}.$$

— А почему вы сопротивление обозначаете через z, а не через R, как обычно принято? — тут же подметил мой собеседник.



— Потому, что через z обозначается полное сопротивление цепи, а через R только активное сопротивление, которое в нашем случае составляет лишь часть полного сопротивления рабочей цепи.

— Я что-то не очень понимаю, — признался он.

— Полное сопротивление рабочей цепи состоит из активного сопротивления этой цепи и индуктивного сопротивления. Активное сопротивление состоит из сопротивления проводов обмотки, соединяющих проводов и сопротивления нагрузки. Индуктивное же сопротивление возникает в обмотке в результате протекания по ней переменного тока и наличия ферромагнитного сердечника. Поэтому полное сопротивление рабочей цепи равно:

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

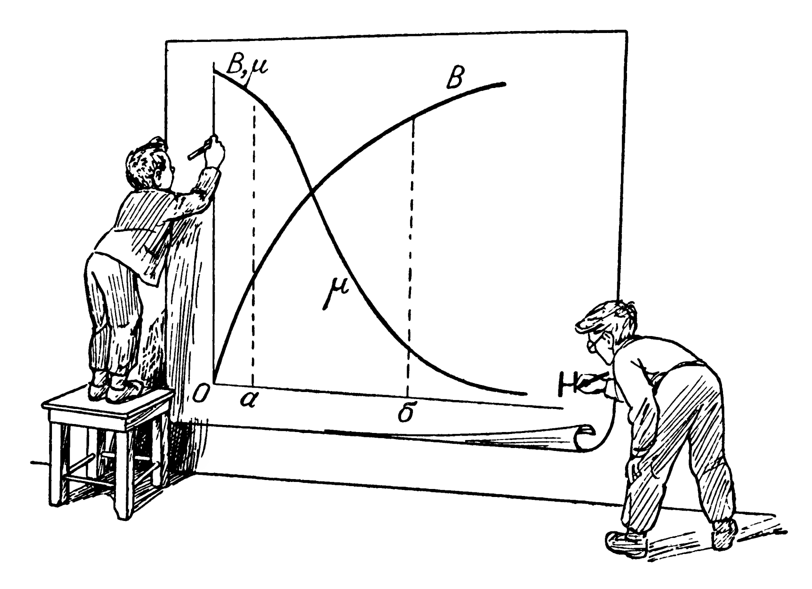
где R — активное (омическое) сопротивление цепи;
ωL — индуктивное сопротивление цепи;
$\omega = 2\pi f$ — угловая частота для переменного тока с частотой f.

— В таком случае L — это индуктивность рабочей обмотки?

— Да, индуктивность, и вот о ней-то придется поговорить подробнее. Дело в том, что индуктивность рабочей обмотки — не постоянная величина. Она зависит от степени намагниченности сердечника дросселя — от величины магнитной проницаемости сердечника $\mu = B/H$.

— Что такое магнитная проницаемость?

— Сейчас объясню. Это магнитная характеристика среды, в которой действует магнитное поле. Если бы вместо сердечника в катушках был воздух, магнитная проницаемость которого равна единице и не зависит от величины напряженности магнитного поля катушек, то индуктивность рабочей цепи была бы неизменной в про-



цессе работы. Но магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника больше единицы и самое главное — она сильно зависит от напряженности магнитного поля.

— Чем больше напряженность, тем больше магнитная проницаемость, — подсказал мне юноша.

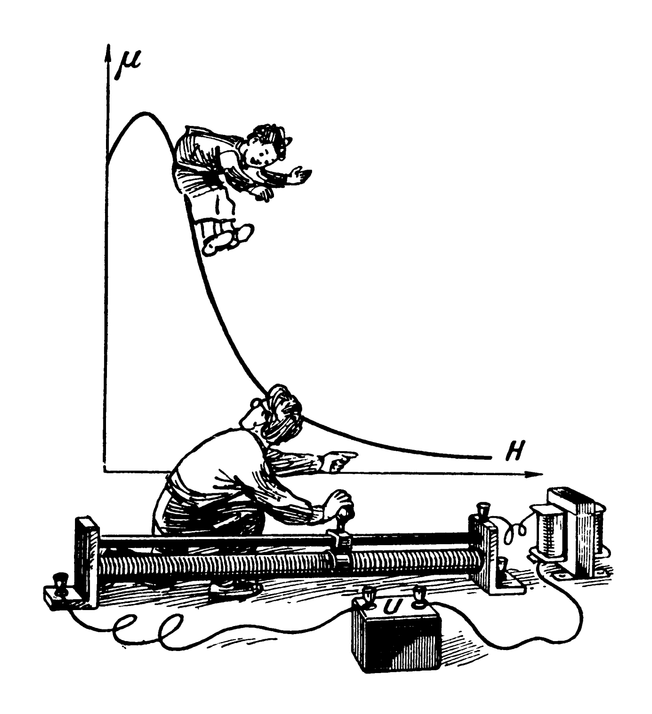
— Нет, характер ее зависимости от напряженности поля более сложен! Вы помните, как идет кривая магнитной индукции сердечника в зависимости от напряженности поля?

— Вот так, — нарисовал он (стр. 15).

— Говоря по правде, вы нарисовали ее несколько упрощенно, но так даже ближе к истине для тех магнитных сердечников, которые применяются в магнитных усилителях. Так вот, магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника при некоторой, но заметьте — малой напряженности поля максимальна. При дальнейшем увеличении напряженности поля магнитная проницаемость сердечника резко уменьшается и в дальнейшем остается почти неизменной. Вот это обстоятельство: значительная величина магнитной проницаемости при малой напряженности магнитного поля и резкое уменьшение ее при увеличении напряженности поля — основа работы магнитного усилителя.

— Не понимаю, — нахмурился он.

— А вы вспомните, что индуктивность и, следовательно, полное сопротивление рабочей цепи, а значит, и ток в ней зависят от величины магнитной проницаемости сердечника. Велика магнитная проницаемость сердечника — велики и индуктивность рабочей цепи и ее индуктивное и полное сопротивления. А если велико полное сопротивление, то ток в рабочей цепи мал. Если же магнитная проницаемость сердечника мала, то все наоборот, ток в рабочей цепи значителен.



Но магнитная проницаемость сердечника в свою очередь зависит от напряженности магнитного поля...

— Понимаю! Изменяя напряженность магнитного поля, можно изменять, а еще лучше сказать — управлять током в рабочей цепи! — не удержался Павел, но тут же осекся: — А как же управлять напряженностью поля?

— Вы забыли, что на среднем стержне сердечника намотана специальная обмотка управления, — подсказал я. — Она-то и предназначена для управления напряженностью поля. Достаточно увеличить ток в этой обмотке, как увеличится напряженность магнитного поля, создаваемого этой обмоткой, а следовательно — уменьшится магнитная проницаемость сердечника. А нам это и надо!

— Да, да, — юноша о чем-то напряженно думал. — Минутку, я, кажется, все понял. Значит, так· когда ток в управляющей цепи мал, напряженность поля также мала, а магнитная проницаемость сердечника велика (точка *a* на рисунке на стр. 15). Поэтому ток в рабочей цепи невелик. Но достаточно увеличить ток в управляющей цепи, как магнитная проницаемость сердечника резко изменится, а ток в рабочей цепи также резко увеличится. Правильно?

Я подтвердил.

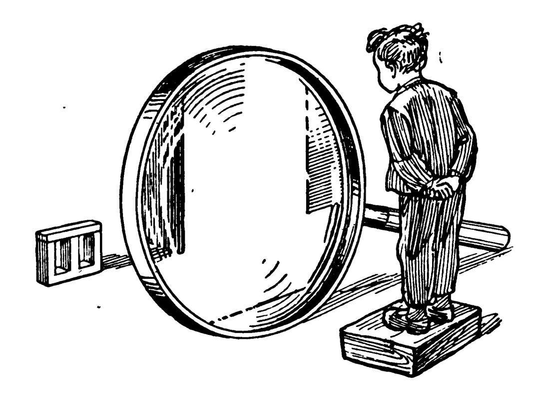
— Так ведь это же совсем просто! — по-мальчишески воскликнул он.

О СЕРДЕЧНИКЕ

Я не стал охлаждать энтузиазм моего слушателя. Пусть считает, что все очень просто. Посмотрю, каким ему покажется дальнейшее!

— Как вы помните, — начал я, — мы говорили о сердечнике обычного трансформатора, какие применяются, например, для электропитания радиоприемников. Так вот, давайте подробнее рассмотрим магнитные свойства сердечников с точки зрения применения их в магнитных усилителях.

Мы уже договорились с вами о таких основных величинах, как напряженность магнитного поля H, магнитная индукция сердечника



B и магнитная проницаемость материала сердечника. μ. Как же эти величины влияют на работу магнитного усилителя?

Я не ожидал ответа на свой вопрос и поэтому продолжал:

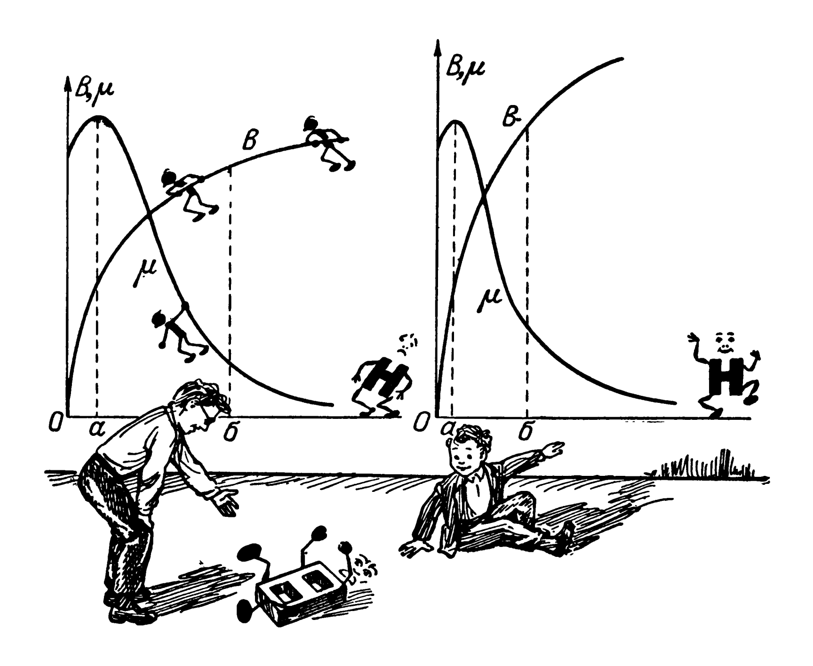
— Начнем с магнитной проницаемости и ее зависимости от напряженности магнитного поля. Надо сразу сказать, что в слабых магнитных полях (при малой напряженности) магнитная проницаемость должна быть как можно большей (см. рисунок на стр. 18).

— А что это дает?

— Очень многое! При большой магнитной проницаемости в слабых полях ток в рабочей обмотке будет незначительным при отсут-

ствии тока в управляющей цепи. Говоря языком электриков и радиотехников, это значит, что при отсутствии сигнала в цепи управления ток в выходной цепи будет очень малым по сравнению с максимально возможным.

Далее, желательно, чтобы с повышением напряженности поля магнитная проницаемость уменьшалась как можно интенсивнее, т. е.



чтобы наклон кривой изменения магнитной проницаемости между точками *а* и *б* (см. стр. 15) был как можно круче.

— Это позволит при незначительном изменении тока управления получить большое изменение тока в рабочей цепи?

— Да, это даст возможность при помощи незначительного тока управлять большим током в рабочей цепи. Ну, и еще одно пожелание: в больших магнитных полях величина магнитной проницаемости должна быть как можно меньшей. Понятно почему?

— Чтобы ток в рабочей цепи был как можно больше, — ответил он и спросил: — А как с магнитной индукцией сердечника?

— От ее величины зависит мощность усилителя. Если усилитель рассчитан на большую мощность, то магнитная индукция насыщения также должна быть значительной. Чем она больше, тем меньше может быть площадь поперечного сечения сердечника, а значит, его размеры и вес. Однако совсем не безразлично, в каких по напряженности полях индукция сердечника достигнет насыщения! Желательно, чтобы насыщение наступало в как можно меньших по

напряженности полях, так как это позволит при малом токе управления достигать максимального тока в рабочей цепи.

— И это все требования к индукции?

— Нет, есть еще одно важное условие: коэрцитивная сила и индукция остаточного намагничивания должны быть как можно меньше.

— Почему?

— А вы не догадываетесь?

Он задумался. Я решил помочь.

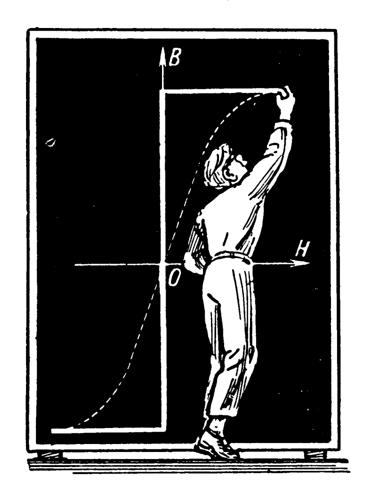
— Предположите, что коэрцитивная сила равна нулю. Что это значит?

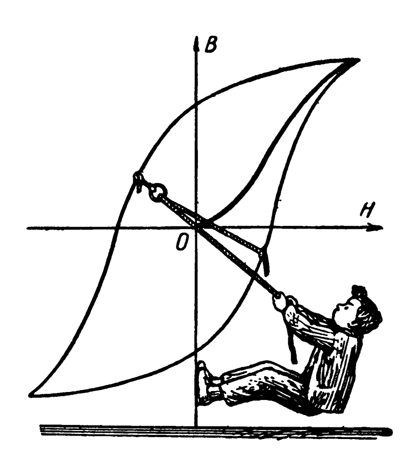
— Это значит, что материал сердечника после прекращения действия магнитного поля полностью размагнитится.

— Следовательно, он легко может быть перемагничен, а значит будет хорошо работать в переменных полях, т. е. на переменном токе. Но самое главное, малая коэрцитивная сила означает большое сжатие петли гистерезиса: получение насыщения сердечника в малых по напряженности полях и резкое изменение магнитной проницаемости при изменении напряженности поля.

— Как раз то, что нам нужно! — закончил он мою мысль.

— Именно! — подтвердил я. — Поэтому материалы для сердечников магнитных усилителей часто характеризуют с помощью так





называемой расчетной кривой намагничивания. Она представляет собой среднюю линию между двумя предельными ветвями петли гистерезиса. Между прочим, вы ее однажды рисовали, помните? (см. стр. 15)? Правда, это вышло у вас случайно, вы нарисовали ее вместо кривой намагничивания, но так как в конце концов нам надо о ней говорить, то я вас тогда не поправил. Так вот, для сердечников магнитных усилителей эта кривая в идеальном случае должна быть прямоугольной (стр. 19). Но это в пределе, а в дей-

ствительности она больше походит на ту, которая показана пунктиром на этом же рисунке. Однако чем больше сжата петля гистерезиса, т. е. чем меньше коэрцитивная сила, тем лучше.

— Получается, что далеко не всякий материал можно использовать для сердечника.

— Конечно! От свойств магнитного материала сердечника очень сильно зависит работа усилителя. Кстати, уж если мы заговорили



об этом, то надо классифицировать магнитные материалы, отобрать из них те, которые пригодны для работы в качестве сердечников магнитных усилителей.

Все магнитные материалы можно разделить на две группы: магнитно-твердые и магнитно-мягкие. Магнитно-твердые материалы обладают большой коэрцитивной силой. Будучи однажды намагничены, они хорошо сохраняют это состояние. Проще говоря, магнитно-твердые материалы — это постоянные магниты. Думаю, вы сами догадываетесь, что для работы в магнитных усилителях они совершенно не пригодны.

Поэтому обратимся к магнитно-мягким. Они характеризуются небольшой коэрцитивной силой и, как правило, значительной магнитной проницаемостью.

— Такие материалы нам подходят!

— К ним относятся: листовые электротехнические стали, из которых изготовляют сердечники различных электрических машин и устройств. Например, пластины сердечника трансформатора, о котором мы до сих пор говорили, изготовлены из электротехнической стали. Такие стали называют кремнистыми, потому что они состоят из сплава железа с 0,5—5% кремния. Они обладают большой индукцией насыщения и поэтому особенно подходят для применения в

магнитных усилителях большой мощности, во всяком случае более 5—10 *вт*.

Меньшей индукцией насыщения, но зато значительно большей магнитной проницаемостью обладают так называемые пермаллои — железо-никелевые сплавы, часто имеющие примеси молибдена, хрома, меди, марганца и других металлов. Лучшие марки пермаллоя имеют начальную магнитную проницаемость в 100 раз большую,



чем электротехнические стали. Но самое главное, у пермаллоев петля гистерезиса очень близка к прямоугольной и сжата, т. е. почти идеальна с точки зрения работы в магнитных усилителях.

Однако у пермаллоев есть и недостатки и, возможно, не менее крупные, чем их достоинства. Прежде всего они очень чувствительны к ударам, давлению, тряске, словом—к механическим нагрузкам. Вот пример: если намотать обмотку непосредственно на сердечнике из молибденового пермаллоя, то возникшие в процессе намотки механические напряжения в сердечнике уменьшат его магнитную проницаемость в несколько раз. Поэтому пермаллоевые сердечники помещают в специальные каркасы для защиты от механических нагрузок, их не рекомендуется ударять; сильно стягивать болтами и лишний раз разбирать. Пермаллой — это капризный материал!

У электротехнических сталей и пермаллоев при работе на переменном токе довольно сильно сказывается поверхностный эффект. Он заключается в вытеснении магнитного потока из глубины материала сердечника на поверхность. Это приводит как бы к уменьше-

нию площади сечения сердечника и одновременно к уменьшению фактической (действующей) магнитной проницаемости, причем этот эффект сказывается тем интенсивнее, чем больше магнитная проницаемость материала. Бороться с поверхностным эффектом можно путем уменьшения толщины пластин сердечника. Для магнитных усилителей пермаллоевые сердечники часто изготовляют, вернее наматывают, из очень тонкой ленты.

Так вот, на частотах в тысячи килогерц магнитная проницаемость пермаллоя уменьшается в десять, а то и больше раз по срав-



нению с величиной на частоте 50 *гц*. В то же время у электротехнических сталей на тех же частотах уменьшение магнитной проницаемости составляет только 10—20%.

— Да, пермаллой действительно капризный! — согласился юноша с моими недавними словами.

— Что делать! Очень трудно получить материалы во всех отношениях идеальные. Не надо относиться к пермаллою пренебрежительно. Он обладает очень большой магнитной проницаемостью, это его большое достоинство, но он применим лишь в постоянных магнитных полях, в крайнем случае — на переменном токе низкой частоты. Что ж, приходится мириться.

— Но магнитные усилители применяются и на более высоких частотах, вы сами говорили. Из какого же материала сердечники таких усилителей?

— Сердечники таких усилителей изготовляют из оксиферов. Их еще называют ферритами.

— Ферриты! Я слышал, они применяются в радиотехнике.

— Да, ведь это магнитодиэлектрики.

— Что значит — магнитодиэлектрики?

— Это значит, что они не электропроводны. Ведь и электротехнические стали, и пермаллой являются проводниками электрического тока. А вы помните, что в проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, индуктируются электрические токи. Такие же токи индуктируются и в материале сердечника, и на это расхо-

дуется значительная часть магнитной энергии, причем совершенно бесполезно. Иными словами, появление токов в сердечнике (так называемых вихревых токов) равноценно потере части магнитной энергии. Очевидно, что чем выше частота, т. е. чем чаще происходит изменение магнитного поля, тем эти потери значительнее. На высоких частотах они вообще забирают «львиную» долю энергии.

Борются с вихревыми токами путем увеличения электрического сопротивления материала сердечника. Для этого, например, в электротехнические стали вводят кремний. Чем выше электрическое



сопротивление материала, тем «неохотнее» появляются в нем вихревые токи, тем меньше потери магнитной энергии.

Вот такие соображения и привели к созданию магнитодиэлектриков. В них магнитные металлические зерна изолированы друг от друга диэлектриком. Поэтому вихревые токи могут возникать лишь в очень небольших по размеру зернах. Тем самым токи эти малы и поэтому потери магнитной энергии в магнитодиэлектриках незначительны даже на очень высоких частотах.

— Значит, ферриты — это как бы магнитный порошок, перемешанный с диэлектриком?

— Нет, ферриты — это другое. Но вы очень удачно определили структуры магнитодиэлектриков: именно порошок из ферромагнитного материала, перемешанный с диэлектриком. Они так и называются — порошковые магнитодиэлектрики. В качестве магнитного порошка в них применяют железо-кремний-алюминиевые сплавы (альсиферы), пермаллой, а также специальное карбонильное железо. Есть и природный ферромагнетик — минерал магнетит. Но ферриты — это другое!

— А что же?

— Как бы это попроще сказать? Это магнитная керамика—неметаллическое вещество, в кристаллической решетке которого вкраплены атомы ферромагнитных материалов. Тем самым ферриты — это магнитные вещества, но неэлектропроводные. Поэтому удельное электрическое сопротивление ферритов в миллионы раз больше, чем металлических ферромагнитных материалов, и потери в них на вих-



ревые токи невелики. В магнитных усилителях они обычно применяются на частотах выше 20 *кгц*.

Ферриты не боятся механических нагрузок, а по магнитным свойствам приближаются к пермаллоям, хотя их магнитная проницаемость много меньше лучших марок «капризного» материала.

— Зато они могут работать на высоких частотах!

ЕЩЕ НЕМНОГО О СЕРДЕЧНИКЕ

— Надеюсь, больше о сердечнике мы говорить не будем? — спросил меня юноша.

Я почувствовал, что долгий разговор о магнитных материалах утомил его.

— Видите ли, о магнитных свойствах материалов сердечников мы больше говорить не будем. Но ведь мы еще ничего не сказали о форме сердечника магнитных усилителей.

— О форме! — удивился он. — А не все ли равно, какая будет форма у сердечника! Важно, чтобы сердечник проводил магнитный поток, для этого его форма должна быть замкнутой. Вот и все.

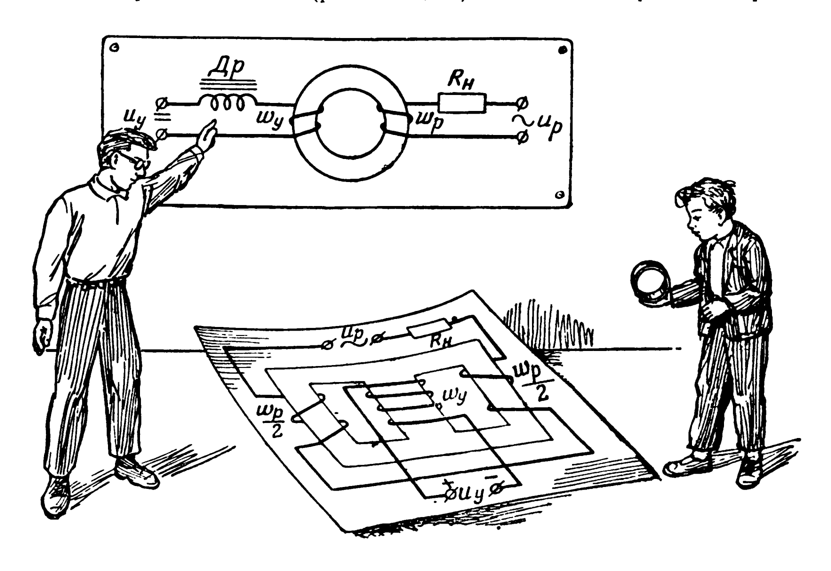
— Нет, дело сложнее, — остановил я его слишком поверхностные рассуждения. — От формы сердечника зависит многое. Вот скажите, можно ли наш трехстержневой сердечник, с которым мы все время имели дело, заменить двухстержневым?

— Можно,— не очень уверенно ответил он.

— Правильно, можно. Ну, а изменит ли это схему усилителя?

— Нет! — решительно заявил он. И добавил: — Ведь магнитный поток будет охватывать и рабочую, и управляющую обмотки. Значит, ничего не изменится!

— Ошибаетесь, изменится! Посмотрите схему на стр. 14: обмотка переменного тока (рабочая цепь) намотана на крайних стерж-



нях. Поэтому переменный магнитный поток, создаваемый в сердечнике переменным током рабочей цепи, проходит только по крайним стержням и не заходит в средний, на котором намотана обмотка постоянного тока (цепь управления). Тем самым в управляющей обмотке не индуктируется переменный ток из рабочей цепи.

Но как только вы замените трехстержневой сердечник на двухстержневой, у которого на одном стержне намотана управляющая, а на другом — рабочая обмотка, то в управляющей цепи будет наводиться переменный ток из рабочей цепи, и работа усилителя нарушится.

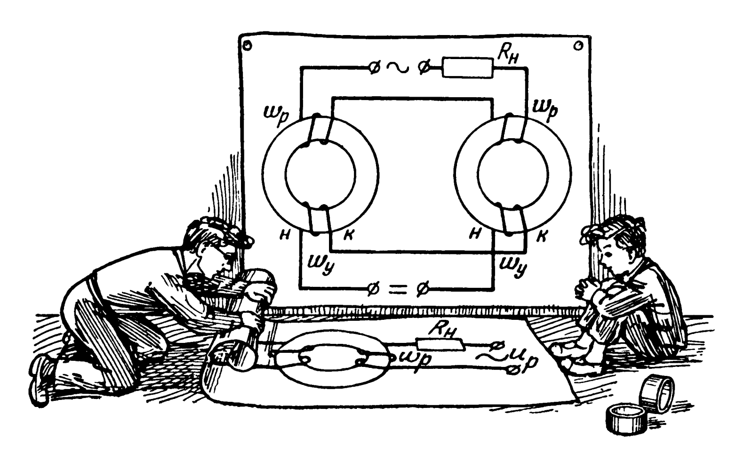
— Выходит, нельзя применять в магнитном усилителе двухстержневой сердечник?

— Можно, но только нельзя допускать появления в управляющей цепи переменного тока. Это можно сделать, включив в цепь управления большую индуктивность (стр. 25), проще говоря — дроссель. Как вы знаете, индуктивность препятствует протеканию в цепи, в которую она включена, переменного тока — для него она представляет большое индуктивное сопротивление.

Магнитные усилители на двухстержневых сердечниках очень распространены, особенно для работы на повышенных частотах.

Такие сердечники чаще всего имеют форму тора — кольца, причем они либо навиваются из тонкой ленты, например пермаллоевой, либо изготовляются из феррита.

Магнитные усилители могут иметь два двухстержневых или тороидальных сердечника. При этом значительно улучшается линейность зависимости тока в рабочей обмотке (на выходе усилителя) от величины сигнала в управляющей цепи (на его входе). Кроме того, при этом может быть уменьшена минимально необходимая



амплитуда управляющего сигнала, т. е. повышена чувствительность усилителя. Чтобы в усилителях с двумя тороидальными сердечниками в управляющей цепи не индуктировался переменный ток из рабочей цепи, управляющие обмотки включают навстречу друг другу (стр. 26). При этом индуктированные в них э. д. с. переменного тока взаимно уничтожаются.

— Надеюсь, теперь о сердечниках уже все сказано! — голос Павла звучал почти умоляюще.

Я хотел было рассказать о конструировании сердечников магнитных усилителей, их конфигурации и определении необходимого объема, но решил, что пока об этом говорить рано.

ИДЕАЛ И РЕАЛЬНОСТЬ

— О чем же речь пойдет теперь? — спросил он меня, чуточку отдышавшись от предыдущих разговоров.

— Пожалуй, о самом трудном, — пообещал я. — Нужно перейти от идеализированного магнитного усилителя, который мы до сих пор рассматривали, к работе реального усилителя.

Он пожал плечами.

— В чем же «идеальность» усилителей, которые мы рассматривали? По-моему, у них хватает недостатков, особенно у их сердечников, — заметил он, намекая на мой длинный рассказ о магнитных материалах.

— Но у реального усилителя их еще больше. Собственно, это и отличает работу реального магнитного усилителя от идеализированного.

«Понимает ли?»—подумал я, взглянув на юношу. Он выжидательно молчал.

— Вспомните, говоря о работе магнитного усилителя, мы как-то само собой приняли, что как только в цепи управления появляется сигнал, в рабочей цепи немедленно изменяется ток, т. е. сигнал управления немедленно передается в рабочую цепь (на выход усилителя), но уже в усиленном виде. Заметьте: немедленно, мгновенно! Но на самом деле это происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием. Проще говоря, усилителю требуется некоторый промежуток времени на усиление сигнала. Пусть этот промежуток времени небольшой, всего доли секунды, но во многих устройствах автоматики он совершенно недопустим. Представьте, что автоматическое устройство должно реагировать на очень быстрые изменения каких-либо величин. Например, оно управляет полетом ракеты, поворотом ее рулей, и должно удерживать ракету на заданном курсе. Допустим, что ракета из-за изменения скорости ветра, плотности воздуха и неравномерной работы двигателей чуть-чуть «рыскает» из стороны в сторону, причем быстрота изменений направления полета меньше времени срабатывания магнитного усилителя, управляющего электромоторами, поворачивающими рули ракеты. К чему это приведет?

Вот ракета отклонилась от курса вправо. На магнитный усилитель поступил управляющий сигнал, который должен вернуть ракету на прежний курс, т. е. повернуть ее влево. Но пока усилитель сработает, ракета вновь самопроизвольно изменит направление полета, уже влево от курса. Теперь ее нужно отклонять вправо, а только «раскачавшийся» к этому времени усилитель даст рулям приказ повернуть ракету по-прежнему влево. Благодаря этому отклонение ракеты от курса еще больше увеличится.

В конце концов при таком «управлении» она совершенно собьется с курса.

— Понятно, но почему усилитель срабатывает не мгновенно?

— В основном потому, что обмотка управления обладает индуктивностью. А вы знаете, что ток в индуктивности не может изменяться мгновенно.

— Почему? — вдруг задал он наивный вопрос.

— Да потому, что при прохождении тока через индуктивность возникает электромагнитное поле, которое обладает определенной энергией. До включения тока поля не было, точнее — энергия поля была равна нулю. А после включения тока поле появилось и имеет определенную энергию. Таким образом произошло изменение энергии. Но разве может энергия измениться мгновенно!

— А почему не может? — последовал вопрос из элементарной физики.

— Для мгновенного изменения энергии требуется бесконечно большая мощность! Понимаете, бесконечно большая! С точки зрения электротехники это означает, что через индуктивность должен проходить бесконечно большой ток. А в реальных условиях ток всегда имеет конечную величину.

— Дошло! — обрадованно воскликнул он. — Это принципиально так же, как происходит с автомобилем: он не может мгновенно

набрать скорость, но чем мощнее двигатель, тем интенсивнее он разгоняется.

— Конечно! Индуктивность в некотором роде подобна массе. Ток в ней не может измениться мгновенно, поэтому на прохождение тока через индуктивность требуется некоторое время. Оно-то и определяет «инерционность» магнитного усилителя — время запаздывания между появлением напряжения управляющего сигнала и соответствующего ему выходного сигнала.

— Подождите, — вдруг прервал он меня, — но ведь в цепи управления проходит постоянный ток. А для постоянного тока наличие индуктивности не препятствие.

— Для постоянного тока да. Но дело в том, что в реальном усилителе в управляющей обмотке проходит не только постоянный ток

— Как не только постоянный? Ведь обмотка управления подключена к источнику постоянного тока.

— Видите, вы сами заметили отличие работы реального усилителя от тех идеализированных случаев, которые мы раньше рассматривали. Ведь нас интересуют главным образом те моменты, когда в управляющей обмотке проходит изменяющийся ток управления. Именно в эти моменты автоматическое устройство срабатывает, т. е. реагирует на изменение внешних условий и вырабатывает ответные сигналы управления. В это время от магнитного усилителя и требуется быстрота срабатывания. А как раз в такие моменты ток в управляющей цепи изменяющийся. Но всякое изменение тока вызывает изменение магнитного поля катушки. Следовательно, вступает в действие индуктивность обмотки управления, препятствующая изменению тока в ее цепи.

Так вот, возвращаясь к тем усилителям, схемы которых мы рассматривали, надо сказать, что они обладают значительным временем запаздывания, доходящим до нескольких секунд. Как видите—немало!

— Ну, это совсем плохо! — огорчился юноша. — Как же тогда они работают в системах автоматики?

— Есть способ уменьшить время запаздывания. Для этого надо в усилитель ввести обратную связь.

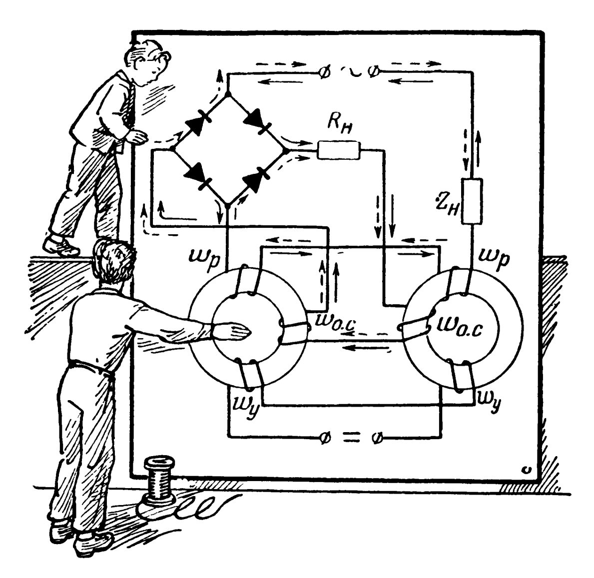
— Я слышал о ней. Она применяется в радиотехнике.

— Принцип действия обратной связи одинаков для всех устройств. В магнитном усилителе обратная связь заключается в том, что изменение выходного тока передается на вход усилителя. Тем самым действие управляющего сигнала как бы усиливается, т. е. управление осуществляется усиленным управляющим током.

— Я что-то не понял, — признался Павел. — Как это: управление осуществляется усиленным управляющим током? Кто усиливает ток?

— Этот же магнитный усилитель! Сейчас поймете. Предположите, что в цепи управления появился сигнал. Начальное изменение тока в этой цепи вызвало некоторое изменение тока в рабочей цепи. Схема усилителя с обратной связью построена таким образом, что ток рабочей цепи проходит, кроме всего прочего, еще и по специальным обмоткам обратной связи (стр. 29), причем предварительно он выпрямляется. Поэтому через обмотки обратной связи он проходит всегда только в одном направлении.

Прохождение изменившегося тока рабочей цепи через обмотки обратной связи приводит к изменению магнитной проницаемости сердечника и тем самым — к дальнейшему, еще большему изменению тока в рабочей цепи. Происходит как раз то, что я говорил: благодаря обратной связи рабочий ток помогает управлять собой току в цепи управления. Иными словами, рабочий ток изменяется



не только от изменения управляющего тока, но и от собственного изменения. Естественно, что благодаря этому изменение тока в рабочей цепи происходит быстрее и много интенсивнее, чем от действия одного тока управления.

— Вероятно, это равносильно тому как если бы увеличилась крутизна изменения магнитной проницаемости сердечника, — подсказал он мне.

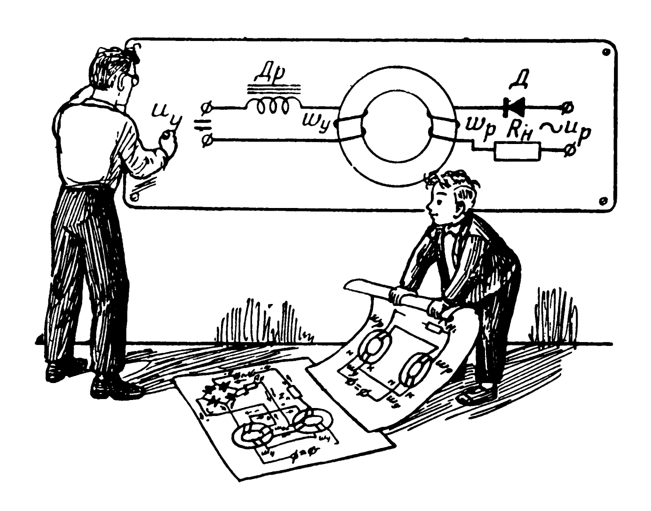
«Странно, — подумал я, — то он задает элементарные вопросы, то делает такие очень не простые догадки!»

— Правильно! Но так как нас интересует не изменение магнитной проницаемости само по себе, а отражение этого на работе усилителя, то можно сказать, что в результате действия обратной связи увеличивается коэффициент усиления магнитного усилителя: маленькое изменение управляющего тока вызывает значительное изменение рабочего тока.

— Но какое отношение это имеет к уменьшению времени запаздывания?

— Самое прямое! Предположите, что нужно сделать магнитный усилитель с заданным коэффициентом усиления. В усилителе без обратной связи для получения такого коэффициента потребуется

намотать обмотку управления с определенным числом витков и при этом она будет обладать определенной индуктивностью. В усилителе же с обратной связью для получения того же коэффициента усиления можно намотать обмотку управления с меньшим количеством витков, потому что действию цепи управления будет помогать цепь обратной связи. Но чем меньше витков обмотки управления, тем меньше ее индуктивность, а следовательно, меньше и задержка управляющего сигнала в этой цепи. Значит, у усилителя с обратной связью время запаздывания меньше. Поняли?



Замечу, что во многих магнитных усилителях с помощью обратной связи удается уменьшить время запаздывания более чем в 100 раз по сравнению с усилителями с таким же коэффициентом усиления, но без обратной связи.

— Да, но значительным усложнением схемы, введением дополнительных обмоток!

— Ну, что касается дополнительных обмоток, то необязательно осуществлять обратную связь через специальные обмотки, можно сделать так называемую внутреннюю обратную связь.

— Каким же образом?

— Используя для этой цели рабочую обмотку. Объяснить подробнее?

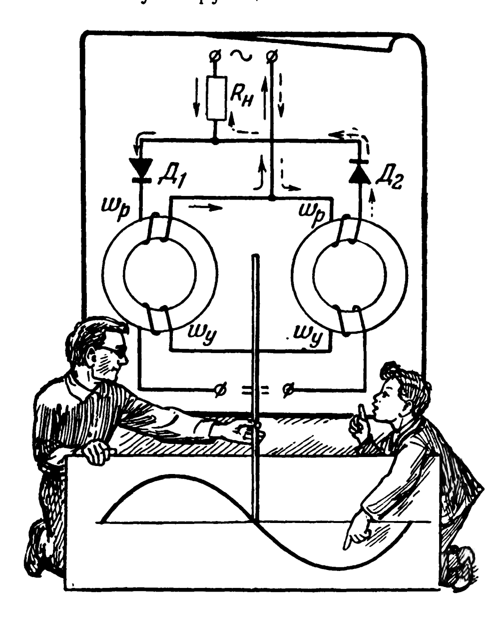
— Да, пожалуйста!

— Вспомните схему магнитного усилителя на торообразном сердечнике (стр. 25). Если включить в цепь рабочей обмотки однополупериодный выпрямитель *Д*, то получится схема простейшего магнитного усилителя с внутренней обратной связью (стр. 30). Давайте проследим, как отразится включение выпрямителя, например полупроводникового диода, на работе усилителя.

Прежде всего по рабочей обмотке будет протекать уже не пе-

ременный, а пульсирующий ток, который состоит как бы из двух токов: переменного и постоянного, а точнее переменной и постоянной составляющих. Заметьте: благодаря включению диода по рабочей обмотке проходит постоянный ток, величина которого, естественно, будет зависеть от силы тока в рабочей цепи. Ну как, начинаете понимать?

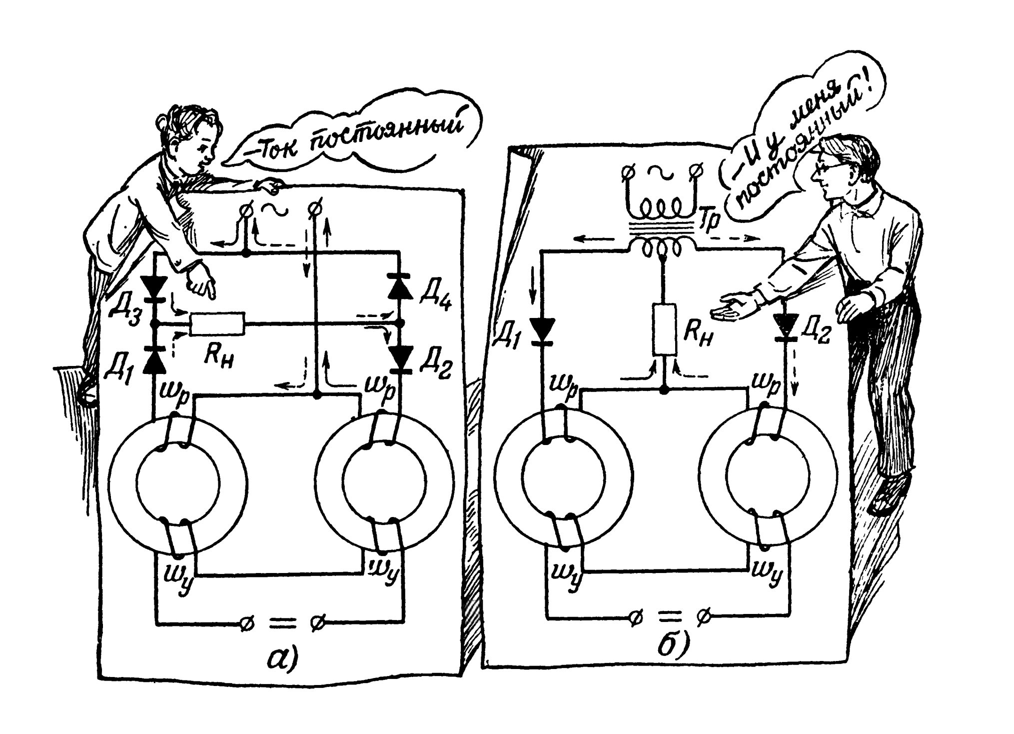
— Еще бы! — воскликнул он. — Изменение управляющего тока приводит к изменению рабочего тока или, говоря вашим языком, к изменению величины пульсирующего тока. А это значит, что изме-



нится и величина постоянной составляющей, проходящей по рабочей обмотке и воздействующей на магнитное состояние сердечника точно так же, как это было в схеме усилителя с внешней обратной связью. Я теперь понимаю, почему такую схему называют схемой с внутренней обратной связью. Она действительно внутренняя!

— Такие усилители еще называют усилителями с самонасыщением. Это потому, что даже при отсутствии управляющего напряжения проходящий через ее рабочую обмотку пульсирующий ток своей постоянной составляющей стремится насытить сердечник и ток на выходе усилителя при отсутствии управляющего сигнала близок к минимальному.

Только что рассмотренная схема усилителя с внутренней обратной связью называется однополупериодной, так как в ней через нагрузку проходит пульсирующий однополупериодный ток. В моменты, когда ток через диод не проходит, нагрузка как бы отключена от питающего напряжения. Однако питать нагрузку таким током не всегда удобно, поэтому чаще применяют двухполупериодные


—Ток постоянный
—И у меня постоянный!
Д3
Д4
Д1
Д2
$R_н$
$w_р$
$w_у$
Тр
а)
б)

усилители с внутренней обратной связью. Вот схема одного из таких усилителей (стр. 31). Как видите, через нагрузку $R_н$ проходит переменный ток, а по рабочей обмотке — пульсирующий, но уже двухполупериодный, т. е. ток проходит в одном направлении, но в оба полупериода питающего переменного тока. Такую схему удобно применять, например, при использовании магнитного усилителя для управления электродвигателями переменного тока.

— А нельзя составить схему таким образом, чтобы через нагрузку проходил постоянный ток?

— Питать нагрузку постоянным током? Можно, но для этого нужен специальный выпрямитель или придется сделать выход усилителя трансформаторным. Вот схемы — стр. 32. На первой из них диоды включены таким образом, что через нагрузку проходит только постоянный ток. Вернее, пульсирующий двухполупериодный ток,— поправился я. —На второй схеме вместо дополнительного выпрямителя применен трансформаторный выход, и опять через нагрузку проходит пульсирующий двухполупериодный ток. Думаю, не надо повторять, что во всех этих схемах действие обратной связи происходит точно так же и по тем же причинам, что и в схеме, о которой мы говорили раньше, — закончил я.

В ДВА ТАКТА

— Я давно хочу вас спросить, — начал Павел. — Как я понял, все усилители о которых мы говорили, не изменяют полярность выходного напряжения при изменении полярности управляющего сигнала. Верно?

— Да, так, — подтвердил я. — И я догадываюсь, о чем вы хотите спросить. Ваш вопрос очень ко времени, потому что сейчас я буду говорить именно о таких усилителях, у которых при отсутствии сигнала управления выходной ток равен нулю и которые изменяют полярность выходного сигнала при изменении полярности управляющего. Такие магнитные усилители называются реверсивными, т. е. способными изменять полярность выходного тока. Иногда их называют двухтактными в отличие от однотактных, которые мы рассматривали раньше.

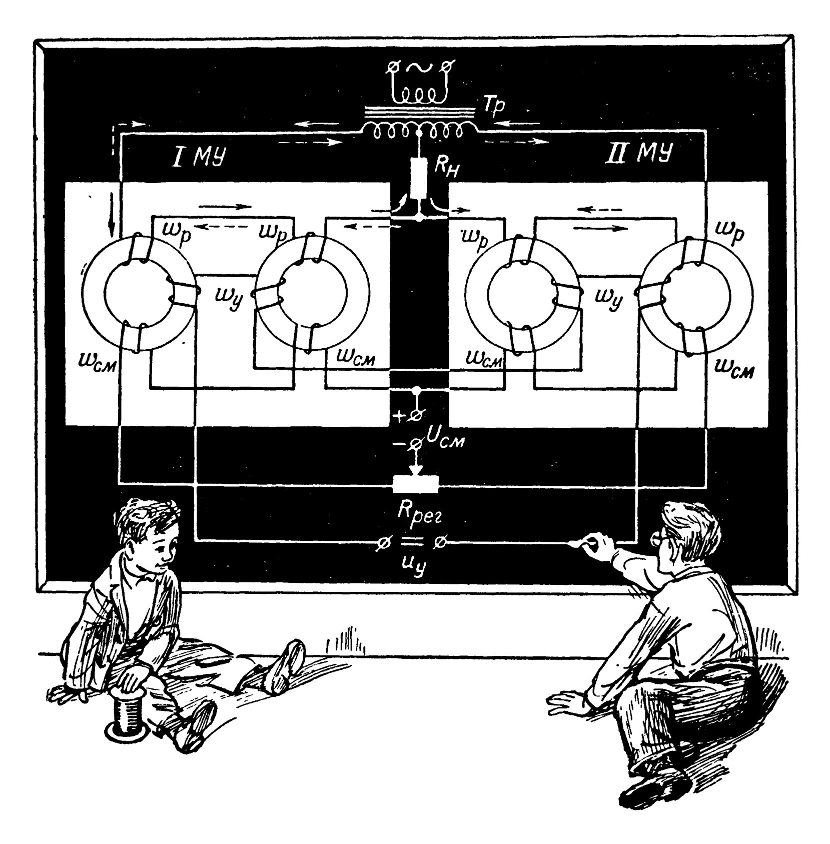
— При чем тут такты?

— А вот при чем: двухтактный магнитный усилитель состоит из двух однотактных, которые включены таким образом, что входной сигнал вызывает увеличение тока на выходе одного однотактного усилителя и уменьшение тока на выходе другого усилителя. Результирующий ток этих усилителей, проходящий по нагрузке, равен разности токов усилителей и при отсутствии входных сигналов, когда токи усилителей одинаковы, равен нулю, а при наличии сигнала управления зависит от него по величине и по знаку.

— Я поясню подробнее, — продолжал я, заметив досадливо наморщенный лоб юноши. — Вот схема двухтактного магнитного усилителя (стр. 34). Рассмотрим ее работу.

— Одну минуту, — прервал он меня, — но в этой схеме на сердечниках есть еще какие-то, уже третьи обмотки. Зачем они?

— Это обмотки смещения. Они предназначены для создания поля начального подмагничивания. Если вы еще не забыли наш разговор о сердечниках магнитных усилителей и влиянии магнитных полей на магнитную проницаемость сердечника, то вы сами догадае-



тесь, что введение соответствующего по величине начального подмагничивания сердечника позволит даже при отсутствии управляющего сигнала работать на участке наибольшей крутизны изменения магнитной проницаемости. При этом усилитель будет обладать наибольшим коэффициентом усиления. Поэтому начальное подмагничивание применяется в усилителях очень часто, как в однотактных, так и в реверсивных.

Итак, рассмотрим работу схемы. Управляющие обмотки в реверсивном усилителе включены таким образом, что управляющий сигнал создает магнитное поле, совпадающее по направлению с полем смещения, например, во II усилителе и противоположное по направлению в I усилителе. Поэтому выходной ток одного усилителя уменьшается, а другого увеличивается. Оба выходных тока создают результирующий выходной ток двухтактного усилителя в нагрузке $R_н$, равный

$$I_р = I_{IМУ} - I_{IIМУ}.$$

Когда же управляющий сигнал отсутствует, ток обоих усилителей одинаков, но противоположен по направлению. Естественно, что

результирующий ток в нагрузке в этом случае равен нулю. Наконец, при изменении полярности управляющего сигнала изменяется полярность и результирующего тока.

— А в двухтактных усилителях также может применяться обратная связь?

— Конечно! Для этого двухтактный усилитель составляется из соответствующих однотактных с обратной связью. Вот к примеру

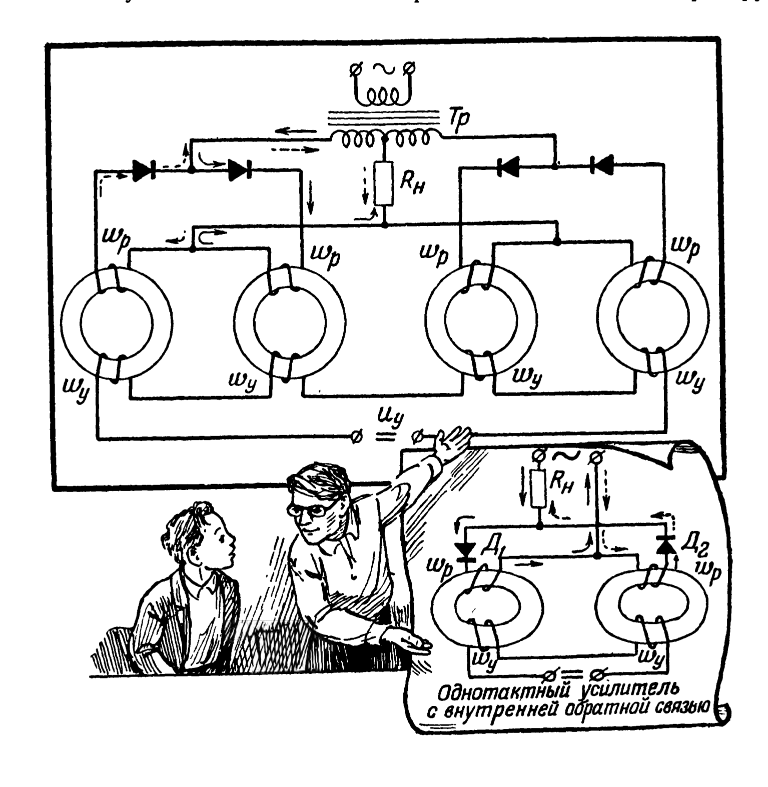


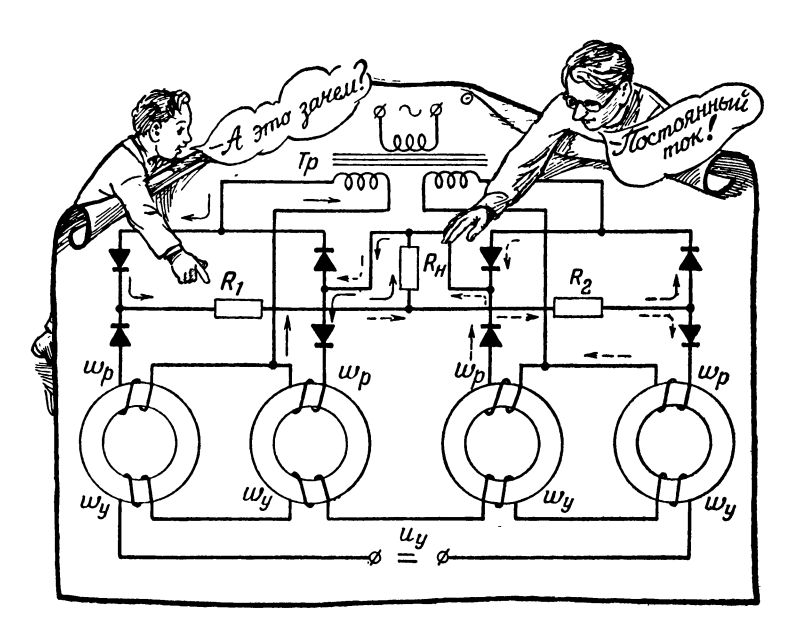
схема двухтактного усилителя с внутренней обратной связью (стр. 35). Кстати, в этой схеме уже нет цепи смещения, так как роль смещения здесь выполняют постоянные составляющие токов в рабочих обмотках. Впрочем, еще лучше, если цепь смещения все же будет и в таком реверсивном усилителе, ибо она позволит установить усилитель при отсутствии входного сигнала точно на нуль выходного тока (сбалансировать усилитель).

— Ну, а могут двухтактные усилители иметь выход на постоянном токе?

— Безусловно, если они составлены из соответствующих однотактных, включенных через так называемые балластные сопротивления, обозначенные на схеме (стр. 36) R_1 и R_2.

— Зачем они?

— Если вы проследите пути выпрямленных токов обоих усилителей, то заметите, что эти токи могут проходить не только через сопротивление нагрузки, но и, минуя нагрузку, через выпрямитель соседнего усилителя (на схеме такие токи показаны пунктиром). Поэтому результирующий ток в нагрузке гораздо меньше разности



токов усилителей. Чтобы несколько ослабить этот недостаток, в схему включают балластные сопротивления R_1 и R_2, величины которых в несколько раз больше сопротивления нагрузки $R_н$. Благодаря им бóльшая часть выпрямленных выходных токов усилителей проходит по сопротивлению нагрузки.

— Но почему вы сказали, что включение балластных сопротивлений только несколько устраняет этот недостаток? Ведь можно взять эти сопротивления достаточно большими, и тогда практически весь ток пойдет только по нагрузке.

Пришла моя очередь удивляться:

— А неужели вы не заметили, что выпрямленный ток, например, левого усилителя проходит не только через нагрузку, но и через «свое» балластное сопротивление R_1, а ток правого усилителя обязательно пройдет через сопротивление R_2. Поэтому ваше предложение об увеличении величины балластных сопротивлений—это, как говорят, «палка о двух концах». Увеличивая балластные сопротивления, вы тем самым значительно уменьшаете и токи усилителей, т. е. их к. п. д.

Схемы двухтактных усилителей с выходом на постоянном токе и с балластными сопротивлениями применяются лишь при малых мощностях, например в измерительной технике и т. п., когда к. п. д. усилителя не имеет существенного значения.

— Значит, двухтактные усилители с выходом на постоянном токе применяются очень редко?

— Нет, этого сказать нельзя. Редко применяется такая схема, которую мы рассмотрели. Однако существуют и более сложные схемы, лучшие по к. п. д. Но даже и они не позволяют получить к. п. д. более 40—50 процентов.

— Судя по вашему тону, — заключил он, — с двухтактными усилителями покончено?

— Как будто, — согласился я, — хотя можно добавить, что существует еще очень много схем магнитных усилителей, предназначенных для самых разнообразных целей. Но они очень сложны. Поэтому сейчас мы не будем о них говорить.

КАК СДЕЛАТЬ МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Читатель, наверно, уже догадался, что все описанное выше произошло не только по дороге из библиотеки. Тогда, в первый день нашего знакомства, мы успели поговорить лишь об очень немногом и условились встретиться снова. Так мы встречались несколько раз, подружились, и он стал заходить ко мне домой. И вот однажды Павел пришел ко мне и сразу, без предисловий, предложил:

— Давайте сегодня поговорим о магнитных усилителях конкретно!

Я удивился:

— А разве до сих пор мы говорили о них не конкретно?

— Я, видимо, не так выразился, — поправился он. — Я хотел сказать, что раньше мы говорили о принципиальных схемах, о влиянии материала и формы сердечника на работу магнитного усилителя и о прочих подобных вопросах. Но мы ничего не говорили о том, как сделать магнитный усилитель, сколько витков должно быть в обмотках, как их намотать.

— Ах вот вы о чем, — догадался я. — Вам хочется от теории перейти к практике. Пожалуй, теперь это уже можно, вы кое-что знаете о магнитных усилителях, но заметьте — немного!

— Я согласен, что знаю о магнитных усилителях немного, но все же...—он просительно посмотрел на меня.

— Хорошо, хорошо, сегодня мы поговорим о постройке магнитного усилителя. Но какой магнитный усилитель вам нужен, для чего?

Он ждал этого вопроса и с готовностью начал:

— Знаете, я тогда пришел в библиотеку узнать о магнитных усилителях потому, что мне нужно было сделать какое-нибудь устройство для поддержания постоянства оборотов якоря электродвигателя в моем магнитофоне.

— А почему вы решили, что для этого нужен магнитный усилитель?

— Я случайно наткнулся на такую мысль в книге. В ней даже была схема, но я тогда ничего не понимал в магнитных усилителях, и она показалась мне очень сложной.

— А почему изменяются обороты?

— Изменяется нагрузка на двигатель. Он перематывает пленку с подающей кассеты на приемную. Изменяется количество пленки на подающей кассете—изменяется и нагрузка на двигатель, а значит и скорость вращения. А отсюда: искажение звучания записи.

— Как же вы думаете выйти из положения?

— Надо регулировать напряжение на двигателе: чем больше нагрузка, тем больше напряжение. Тогда обороты будут постоянными.

— Правильно. А как же это сделать?



— Не знаю, — признался он. — Помню, в книге было сказано, что для этого можно приспособить магнитный усилитель.

Я задумался.

— Какой у вас двигатель?

— В том-то и дело, что двигатель у меня не обычный: постоянного тока!

— Ну и что?

— Наверно, с таким двигателем сложнее, чем с электродвигателем переменного тока.

— Ничуть. Вы же знаете, что нагрузку в магнитном усилителе можно включать и по переменному, и по постоянному току. Так как же регулировать напряжение на вашем двигателе?—вновь спросил я.

Он молчал.

— Давайте подумаем вместе. Что происходит при увеличении нагрузки на вал двигателя?

— Уменьшается скорость вращения.

— И одновременно увеличивается ток в обмотке якоря, — подсказал я

— Да, конечно, — согласился юноша после недолгого раздумья.

— А значит, уменьшится напряжение на зажимах обмотки якоря. Вот это явление мы и используем для автоматического регулирования скорости вращения.

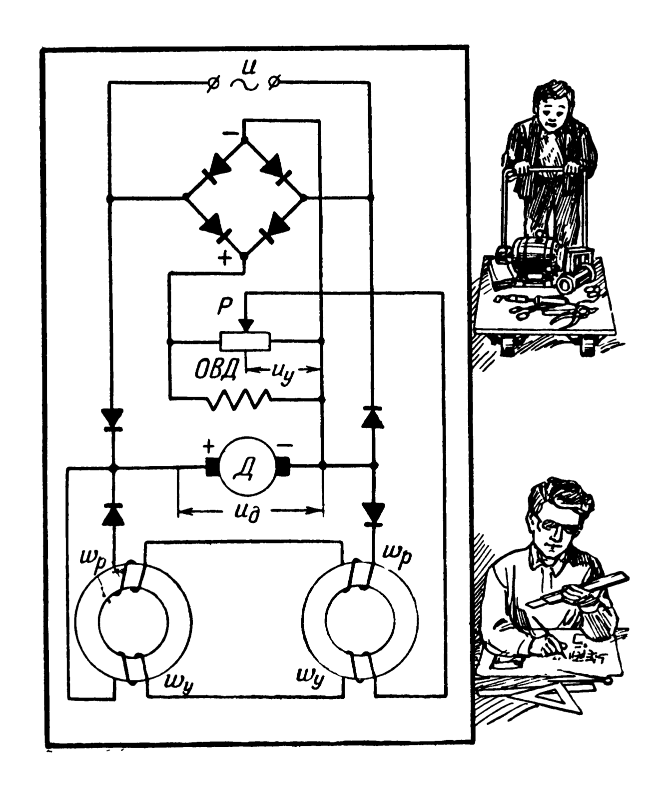
— Понятно: увеличив напряжение на обмотке якоря. Вот только как сделать, чтобы это происходило автоматически?

— При помощи магнитного усилителя. Изменение напряжения на обмотке якоря при изменении нагрузки как раз и будет тем самым сигналом управления, о котором мы столько говорили в прошлые наши встречи, когда рассматривали принцип работы магнитного усилителя.

Павел сосредоточенно наморщил лоб, стараясь от теоретических представлений перейти к нужной рабочей схеме. Но, видимо, это было не так-то легко. Он припоминал разговоры об изменении магнитной проницаемости сердечника, о влиянии индуктивности обмотки на скорость срабатывания и прочую теоретическую премудрость. Но перед ним стояла конкретная задача: как использовать небольшое изменение напряжения на обмотке якоря для регулировки оборотов двигателя?

Я должен был помочь.

— Давайте включим обмотку якоря двигателя на выход магнитного усилителя, собранного по схеме *а* на стр. 32. Обмотку якоря включим вместо нагрузки $R_н$, а обмотку возбуждения двигателя *ОВД* присоединим через выпрямитель к сети питания.



Посмотрим теперь, как будет работать схема. Очевидно, что напряжение и ток в обмотке якоря двигателя определятся, помимо всего прочего, режимом работы магнитного усилителя, а точнее: током в его рабочих обмотках. Но ток в этих обмотках усилителя зависит от тока в обмотке управления. Следовательно, изменяя ток в цепи управления магнитного усилителя, например, включив в цепь управления потенциометр, можно регулировать скорость вращения. Понятно?

— Конечно! При этом изменяется напряжение на выходе усилителя и на зажимах обмотки якоря двигателя.

— Теперь дальше: параллельно обмотке возбуждения включим потенциометр P, движок которого соединим с одним концом обмотки управления магнитного усилителя. Другой конец этой обмотки присоединим к якорю двигателя (см. рисунок на стр. 39). Скажите, от чего зависит ток в цепи управления магнитным усилителем?

— От разности между напряжением $u_у$ на движке потенциометра и напряжением $u_д$ на якоре двигателя.

— Правильно. Поэтому достаточно току в обмотке якоря увеличиться вследствие увеличения нагрузки на валу, как напряжение $u_д$ уменьшится...

—Понял, понял! При этом возрастает разность $u_у—u_д$, и ток в цепи управления увеличится, а значит увеличится и напряжение на выходе усилителя. На обмотку якоря двигателя поступит большее напряжение, и обороты якоря возрастут. Если же, наоборот, нагрузка на двигатель уменьшится, то разность $u_у—u_д$ также уменьшится, а значит уменьшатся и обороты двигателя. Выходит, обороты будут автоматически поддерживаться постоянными вне зависимости от нагрузки на вал двигателя!

— Совершенно верно. Установить же нужное число оборотов можно регулировкой потенциометра P, т. е. изменением управляющего напряжения $u_у$, — закончил я.

— Чудесно! Как просто! А я не мог додуматься! — он даже огорчился. — Ну, а как же сделать такой усилитель? Какие у него должны быть сердечники, сколько витков в обмотках и какого провода?

Юноша ждал готовых рецептов, но мне хотелось, чтобы он подумал.

— Что касается материала и формы сердечников, то это вы можете выбрать сами, если вспомните, что мы говорили по этому поводу раньше. При выборе учтите, что частота, на которой будет работать усилитель, невелика, всего 50 *гц*, а мощность усилителя должна быть, наоборот, довольно значительной, наверное до сотни ватт.

Юноша кивнул:

— Да, мощность двигателя 50 *вт*. — Он подумал и добавил: — Мне кажется, для сердечников можно применить обычную трансформаторную сталь, раз частота небольшая, да и требуемое усиление тоже не очень велико. Правильно?

Я подтвердил его выводы, и он тут же задал старый вопрос:

— А обмотки?

— Если говорить строго, то количество витков рабочей обмотки зависит от величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля сердечника, а также частоты и напряжения источ-

ника питания. Для магнитных усилителей с внутренней обратной связью (а именно такой усилитель мы выбрали для управления двигателем) число витков рабочей обмотки можно определить по формуле

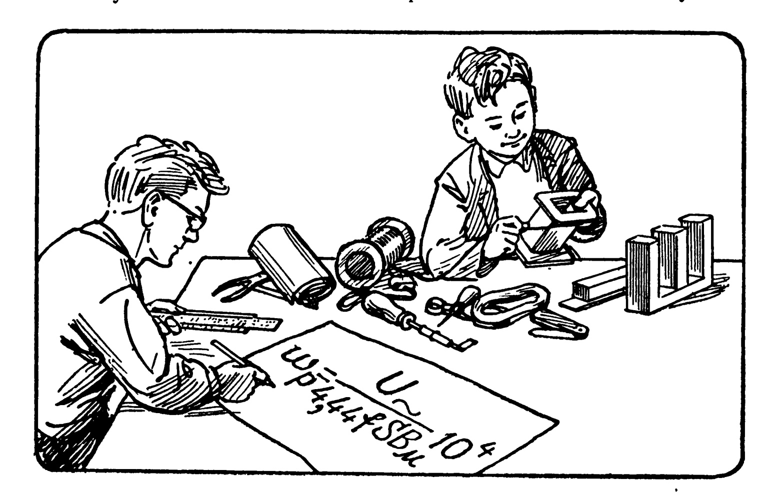
$$w_p = \frac{U_{\sim}}{4,44 f S B_m} 10^4,$$

где S — площадь поперечного сечения одного сердечника, *см*²;

B_m — начальное (амплитудное) значение переменной составляющей магнитной индукции материала сердечника, *тл* (тесла), определяемое по справочнику.

При пользовании этой формулой надо иметь в виду, что напряжение источника питания $U_{\sim}$ должно быть в 1,3—1,8 больше того максимального напряжения, которое нужно получить на нагрузке.

Для магнитных усилителей с внешней обратной связью и двухтактных усилителей число витков рабочей обмотки надо удвоить



против результата, подсчитанного по формуле. Что же касается обмоток обратной связи, то количество витков в них выбирается примерно равным количеству витков рабочей обмотки.

Для двухтактных усилителей полученное число витков обмотки обратной связи надо уменьшить вдвое.

Диаметр проводов для рабочей обмотки, а также обмотки обратной связи рассчитывают таким же образом, как это делается при расчете силового трансформатора.

— Исходя из допустимого нагрева обмоток?

— Да. Но только при этом надо помнить, что сопротивление этих обмоток не должно превышать 10—30 процентов сопротивления нагрузки, иначе полезная мощность на выходе усилителя будет невелика. Поэтому если окажется, что сопротивление обмоток

соизмеримо с сопротивлением нагрузки, то диаметр провода этих обмоток надо увеличить.

— А как насчет обмотки управления?

— Количество витков этой обмотки выбирают в зависимости от необходимого сопротивления цепи управления по формуле

$$w_{у} = \sqrt{\frac{Q_{у} R_{у} K_{з}}{n \rho l_{у}}},$$

где $Q_{у}$ — площадь окна сердечника, которая остается для размещения обмотки управления, *мм*²;

$R_{у}$ — сопротивление обмотки управления, *ом*;

$K_{з}$ — коэффициент заполнения, в первом приближении равный 0,45;

n — количество последовательно включенных обмоток управления;

ρ — удельное сопротивление обмоточного провода (для меди 0,0175 *ом·мм²/м*);

$l_{у}$ — средняя длина витка обмотки, *м*.

Диаметр провода обмотки управления определяется из формулы

$$q_{у} = \sqrt{\frac{Q_{у} n \rho l_{у} K_{з}}{R_{у}}},$$

где $q_{у}$ — площадь сечения провода, *мм*².

— Теперь я сделаю усилитель! — воскликнул юноша, переписывая к себе в тетрадь формулы расчета магнитного усилителя.

Он уже собирался уходить, когда я остановил его вопросом:

— Скажите, у вас есть два исправных силовых трансформатора?

— Для питания радиоприемников? Да, есть. Они вам нужны?

— Нет, они нужны вам. Если у вас есть два исправных силовых трансформатора, то вам нет нужды доставать сердечники, возиться с намоткой обмоток и прочим. По существу, у вас в таком случае уже есть магнитный усилитель, нужно лишь укрепить трансформаторы на шасси, подсоединить обмотки да смонтировать селеновые выпрямители.

— Как так! — удивился он.

— Очень просто! Из двух обыкновенных силовых трансформаторов можно без всяких переделок собрать магнитный усилитель на мощность, равную номинальной мощности одного трансформатора. И неплохой усилитель! Он обеспечит усиление мощности порядка 1 000—2 000!

— Как же это сделать?

— Вспомните нашу схему на стр. 39 и перерисуйте ее так, чтобы получилась схема, показанная на стр. 44. Как видите, принципиально ничего не изменилось. В качестве рабочих используются первичные обмотки *I* трансформаторов, а в качестве управляющих — высоковольтные вторичные обмотки *II*. Обмотки попарно соединяются последовательно, и вторичные обмотки включаются встречно по

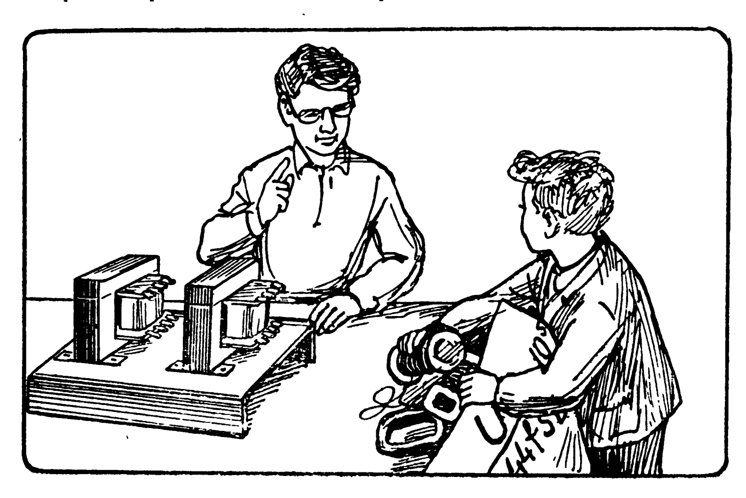
отношению к первичным. Такое встречное включение необходимо для того, чтобы на зажимах цепи управления не появлялось напряжение с частотой источника питания.

— А как узнать, что обмотки включены правильно?

— Для этого рабочие обмотки присоединяют к источнику переменного тока с небольшим напряжением...

— Почему с небольшим напряжением?

— Можно и с большим, но в этом случае на зажимах управляющей обмотки возникает высокое напряжение: в 500—600 вольт; экспериментировать с таким напряжением не безопасно. Так вот,



после подключения рабочих обмоток к источнику переменного тока к зажимам обмоток управления присоединяют высокоомный вольтметр переменного тока и переключают концы рабочих обмоток таким образом, чтобы получить минимальные показания вольтметра. Затем напряжение источника питания повышают до нормального $U_{\sim}$ и проверяют разбалансировку усилителя, измеряя напряжение на зажимах цепи управления, которое не должно быть больше

$$(0{,}05 - 0{,}1)U_{\sim}\frac{w_{\text{у}}}{w_{\text{р}}},$$

и чем меньше это напряжение, тем лучше.

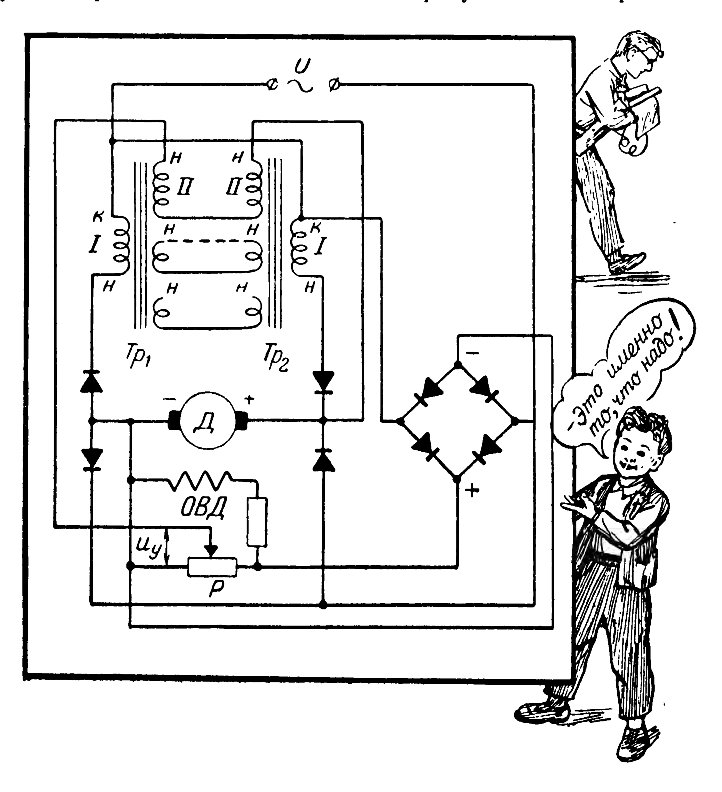
— В этой формуле $w_{\text{р}}$ и $w_{\text{у}}$ — количество витков рабочей и управляющей обмоток?

— Да.

— Но ведь на силовых трансформаторах есть и накальные обмотки. Что с ними делать?

— Их можно использовать в качестве обмоток смещения, соединив их последовательно и правильно сфазировав. Последнее определяют по вольтметру, присоединив его к зажимам фазируемой

цепи и переключая фазируемые обмотки таким образом, чтобы показания вольтметра были наименьшими. Если на трансформаторе имеется обмотка накала кенотрона, то эти обмотки соединяют таким же образом, причем свободные концы возможно потребуется замкнуть накоротко, так как это вызовет принудительное выравнивание



параметров обоих трансформаторов, уменьшит разбаланс и в несколько раз снизит переменное напряжение на зажимах цепи управления. Правда, при этом несколько повысится инерционность усилителя, но для вас это не играет роли.

— Наконец, о правильном включении обмоток обратной связи,— начал было я, но Павел перебил:

— У меня же схема с внутренней обратной связью!

— Ну и что,— возразил я.— А вдруг вам потребуется схема именно с внешней обратной связью! Тем более мы разобрали такие схемы, поэтому надо сказать об их налаживании. Обмотки обратной связи включаются после фазировки цепей управления и смещения, т. е. когда усилитель уже работает. Если включение обмоток обратной связи не изменяет работы усилителя (коэффициента уси-



ления), то надо поменять концы обмотки одного из сердечников. В результате коэффициент усиления либо уменьшится, либо увеличится. В первом случае это будет означать отрицательную, а во втором положительную обратную связь. Переход от одного вида обратной связи к другому можно осуществить либо путем изменения направления тока в обмотках обратной связи ...

— Переключением концов этих обмоток?

— Да, либо изменением полярности напряжения смещения, если смещение предусмотрено по схеме усилителя.

Я ожидал вопросов, но юноша собрал схемы, еще раз задумчиво перелистал тетрадь, в которой он кратко конспектировал наши беседы.

— Спасибо! — сказал он просто.

Мы распрощались. А через несколько дней я нашел у себя в почтовом ящике ту самую его тетрадку, в которую он записывал наши беседы. К ней была приложена записка: «Если дополнить записи в этой тетрадке, то получится небольшая книжка о магнитных усилителях. Мне кажется, это стоит сделать».

Я так и сделал.

СОДЕРЖАНИЕ

КНИГИ МАССОВОЙ РАДИОБИБЛИОТЕКИ, НАМЕЧЕННЫЕ К ВЫПУСКУ В IV квартале 1963 г.

КУПРИЯНОВИЧ Л. И., **Электроника в быту**, 3 л., 12 коп.

МИКИРТИЧАН Г. М., **Транзисторный супергетеродин с КВ диапазоном**, 2 л., 8 коп.

ГАНЗБУРГ М. Д., **Радиовещательные приемники**, 1 л., 4 коп.

ДОЛЬНИК А. Г., **Микрофоны**, 1 л., 4 коп.

ЛАБУТИН В. К., **Транзисторы общего назначения**, 1 л., 4 коп.

ГЕЛЛЕР А. Г., **Селеновые вентили**, 2 л., 8 коп.

МАЛИНИН Р. М., **Полупроводниковые выпрямители**, 2 л., 8 коп.

СОБОЛЕВСКИЙ А. Г., **Материалы в радиоэлектронике**, 3 л., 12 коп.

ТАРАСОВ Ф. И., **Кенотроны**, 1 л., 4 коп.

ТАРАСОВ Ф. И., **Кинескопы**, 1 л., 4 коп.

Соболевский Анатолий Георгиевич

Магнитный усилитель — что это такое? М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 48 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 482).

Редактор *В. А. Бурлянд* Техн. редактор *Н. А. Бульдяев*

Сдано в набор 16/IV 1963 г. Подписано к печати 2/VIII 1963 г.
Т-09008 Бумага 84×108¹/₃₂ 2,46 печ. л. Уч.-изд. л. 2,9
Тираж 69 000 экз. Цена 12 коп. Заказ 196

Типография № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Цена 12 коп.